

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОТИПА СВЕТОДИОДНОЙ
СИСТЕМЫ МОНИТОРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
КАЛОРИМЕТРА УСТАНОВКИ MPD НА КОЛЛАЙДЕРЕ NICA

©2025 г. А. Г. Денисов^а, А. Ю. Дубровин^б, А. А. Дурум^{а,*}, М. Ю. Костин^а,
Ю. Ф. Кречетов^б, О. В. Кутинова^б, А. Ю. Семенов^б, Е. В. Сухов^б,
И. А. Тяпкин^б, В. В. Устинов^б, А. А. Янович^а

^аИнститут физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”

Россия, 142281, Протвино, Московская обл., площадь Науки, 1

^бОбъединенный институт ядерных исследований

Россия, 14198, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6

*e-mail: durum@ihep.ru

Поступила в редакцию 10.09.2024 г.

После доработки 26.11.2024 г.

Принята к публикации 09.11.2024 г.

В ОИЯИ на коллайдере NICA создается многоцелевой детектор MPD для изучения свойств горячей и плотной ядерной материи в точке взаимодействия встречных пучков тяжелых ионов. Электромагнитный калориметр в новой экспериментальной установке отвечает за идентификацию γ -квантов, электронов (позитронов), измерение их энергии и координат, а также за отделение от адронов. Для стабильной работы 38400 каналов калориметра разработана и исследована светодиодная система мониторинга с оптоволоконной раздачей света.

1. ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитный калориметр (ЭМК) проективной формы установки MPD [1] состоит из 38400 башен пирамидальной формы 64 различных типов, объединенных в 2400 модулей и 50 полусекторов. Калориметр оптимизирован для работы в области умеренных энергий (до 1.0–1.5 ГэВ), его СЭМПЛ-фракция составляет 30–32%. Каждая башня типа “шашлык” состоит из 210 слоев чередующихся сцинтилляционных пластин LEGO-типа

толщиной 1.5 мм и свинцовых пластин толщиной 0.3 мм, что составляет примерно 11 радиационных длин. Свет от каждой сцинтилляционной пластины собирается 16 спектросмещающими волокнами (WLS) Kuraray Y11-200 диаметром 1.2 мм на фотоприемник Hamamatsu MPPC S13360-6050 с активной областью 6×6 мм². В качестве отражателя для боковых сторон каждой башни используется специальная эпоксидная диффузная краска с добавлением пигмента TiO₂. Ожидаемое энергетическое разрешение калориметра оценивается как $\Delta E/E \approx 4\%$ при энергии фотонов 1 ГэВ [2].

Для контроля и управления состоянием электромагнитного калориметра используются системы контроля высокого и низкого напряжений питания, а также система мониторинга работы фотодетекторов и электроники считывания. В цели последней системы не входит обеспечение точной калибровки детекторов и электроники; задачи ограничиваются контролем общей работоспособности элементов калориметра и отслеживанием возможных значительных изменений характеристик детектора. С учетом этого, а также ожидаемого энергетического разрешения калориметра точность мониторинга на уровне 1–2% была признана достаточной. Необходимость контроля значительного количества ячеек калориметра накладывает дополнительные требования: система должна быть достаточно простой и надежной, стоимость мониторинга каждой ячейки калориметра (канала электроники считывания) не должна быть слишком высокой.

Контроль стабильности работы элементов калориметра и электроники можно осуществить различными способами: с помощью радиоактивного источника [3] либо с помощью лазера [4] или светодиодов [5] с различными схемами разводки света по башням. В связи с развитием микроэлектроники и удешевлением светодиодов все большее количество физических экспериментов использует последний способ контроля.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕПЦИЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИРОВАНИЯ

Для ЭМК установки MPD были разработаны и исследованы три концепции системы мониторинга на основе использования Ultra-Bright-Blue-светодиодов в качестве источника света с последующей оптоволоконной раздачей света для каждой башни (сплит-система мониторинга).

В первых двух свет от светодиода попадал в диффузный смеситель, а из него по оптическим волокнам распределялся по детектору. Известно, что тефлон и как частный случай спектралон является эталоном диффузного отражения. Были изготовлены прототипы из спектралона двух конфигураций: интегрирующая сфера и интегрирующий цилиндр в качестве смесителя-раздатчика света (рис. 1).

Рис. 1. Фотография тестового стенда для изучения различных схем разводки света.

2.1. Исследование сплит-системы на основе интегрирующей сферы

В первом прототипе свет от светодиода поступал в интегрирующую сферу диаметром 75 мм внутри разборного куба 85×85 мм², замешивался до однородного (более 90%) состояния и попадал в жгут кварцевых волокон диаметром 1 мм, которые и доставляли свет до точки назначения. В сфере были предусмотрены отверстия под жгут выводящих свет оптических волокон, светодиод и для мониторингового фотодиода. Отверстия расположены так, чтобы свет от светодиода попадал в жгут волокон не напрямую, а только после многократного отражения. К недостатку данной конфигурации следует отнести большие потери света при переходе сфера–жгут из-за “косых” лучей, идущих под большими углами в сфере, и малого телесного угла захвата света волокнами. Последнее приводит к небольшому ухудшению однородности света от волокна к волокну при общей потере интенсивности светового потока. Измерения светового потока непосредственно от светодиода и интегрального потока от жгута волокон показали снижение интенсивности света в 9.1 раз для данной конфигурации сплит-системы с нормировкой на сигнал от мониторингового фотодиода.

2.2. Исследование сплит-системы на основе интегрирующего цилиндра

В качестве второго прототипа сплит-системы был рассмотрен толстостенный интегрирующий цилиндр длиной 110 мм и внутренним диаметром 20 мм, в одном из оснований которого размещался жгут волокон. Свет от светодиода через одно из волокон жгута попадал в цилиндр, замешивался до однородного состояния и через остальные волокна доставлялся до точки назначения. Измерения светового потока непосредственно от светодиода и интегрального потока от жгута волокон показали снижение интенсивности света в 1.4–1.6 раз при засветке светодиодом разных входных волокон с нормировкой на сигнал от мониторингового фотодиода. Достоинства данной конфигурации таковы:

- сплит-систему можно делать в виде цилиндров компактных размеров, раздавая свет от одного светодиода через цепочку таких распределителей к точкам назначения;
- малые потери света, так как отсутствуют “косые” лучи, которые не попадают в телесный угол захвата света волокнами;
- экономия на количестве волокон.

Общим достоинством интегрирующих сферы и цилиндра является низкая неоднородность светового потока для отдельных башен калориметра, которая составила менее 10% в абсолютных величинах сигнала. Недостатком можно считать увеличение

трудозатрат по заведению света мониторными волокнами на фотодетекторы или сцинтилляционные пластины.

2.3. Исследование сплит-системы на основе волокна бокового свечения

В качестве третьего прототипа системы мониторинга была рассмотрена сплит-система на основе волокна бокового свечения SOF-2 [6], способного излучать свет в поперечных направлениях. Для физической защиты волокна от повреждений при установке в детектор данное волокно помещалось в защитную прозрачную поликарбонатную трубку с внутренним диаметром 3 мм и толщиной стенки 1 мм. Первичные результаты измерений показали сильное влияние трубки на световыход. Впоследствии было обнаружено, что причиной является загрязнение защитных трубок как при их изготовлении, так и при транспортировке. Это загрязнение может быть убрано, например мыльным раствором. После проведения данной процедуры влияние трубки на световыход и однородность светосбора вдоль волокна оказалось незначительным.

Для тщательного изучения свойств данного волокна были созданы два измерительных стенда.

2.3.1. Первый стенд. Использовался светонепроницаемый ящик, в котором было натянуто волокно SOF-2 длиной 3.5 м диаметром 2 мм. Это волокно было продето внутри отрезка защитной поликарбонатной трубки длиной около 20 см. Фотодетектор ФЭУ-115М просматривал волокно, прилегая к трубке в ее середине. ФЭУ-115М вместе с трубкой перемещался с помощью специальной каретки вдоль волокна. Волокно с одного края засвечивалось светодиодом L7113PBC-A со средней длиной волны 470 ± 10 нм и силой света более 1000 мКд. В качестве разветвителя света от светодиода использовался описанный выше интегрирующий цилиндр, в который были вклеены волокно SOF-2 и четыре прозрачных транспортных волокна диаметром 1 мм. Последние передавали свет на фотодиод для проверки стабильности измерений. Сигналы с ФЭУ и фотодиода считывались ЗЦП LeCroy 2249A. В каждой точке набиралось 20000 событий, среднее значение и ошибка измерения вычислялись с помощью аппроксимации функцией Гаусса полученного спектра.

Строился график соответствующих средних значений, данные аппроксимировались суммой двух экспоненциальных функций, и вычислялись длины затухания по формуле

$$I(x) = \exp(p_0 + p_1 x) + \exp(p_2 + p_3 x), \quad (1)$$

где $I(x)$ – измеряемая интенсивность света, $\lambda_1 = -1/p_1$, $\lambda_2 = -1/p_3$ – длины затухания для “короткой” λ_1 и “длинной” λ_2 экспоненциальных функций, x – расстояние от точки измерения до источника света, p_0 и p_2 – коэффициенты нормировки. Для идеального случая коэффициент λ_1 описывает длину затухания света, попавшего в волокно не под углом

внутреннего отражения и, как следствие, быстро выходящего из волокна. Коэффициент λ_2 соответствует длине затухания света, проходящего волокно под углом внутреннего отражения. Величины коэффициентов зависят от типа и специфики производства волокна: наличия насечек или полупрозрачности оболочки волокна; неэффективности отражающей способности оболочки; изменения угла прохождения света вследствие нетолерантности толщины волокна; присутствия неоднородностей, на которых рассеивается свет и т.д.

Были проведены измерения кривой затухания света в волокне для двух вариантов: в первом торцы волокна обрезаны алмазной фрезой без дополнительной полировки; во втором на дальний от светодиода торец и боковую поверхность волокна на глубину 5 мм была нанесена белая диффузная краска на основе пигмента TiO_2 . Результаты измерений световых выходов в фотоэлектронах представлены на рис. 2. Из аппроксимации данных по формуле (1) были получены длины затухания в волокне, которые составили $\lambda_1=13\pm 1.2$ см, $\lambda_2=124\pm 2.5$ см для волокна без краски и $\lambda_1=18\pm 2.1$ см, $\lambda_2=141\pm 5.7$ см с нанесенным диффузным отражателем. Видно, что нанесение отражателя увеличивает длину затухания примерно на 20%. Для каждой точки измерений (рис. 2а) сигнал считывался через ЗЦП с реперного фотодиода и строился график нормализованных значений в зависимости от времени измерения (рис. 2б). Данные на графике показывают стабильность работы системы за время измерений.

Рис. 2. а – Зависимость сигнала в фотоэлектронах от расстояния до светодиода...

Получена оценка потери света при переходе через жгут спектросмещающих WLS-волокон до фотодетектора на конце башни ЭМК. В первом случае свет снимался с помощью ФЭУ-115М непосредственно с волокна через защитную трубку. Во втором случае трубка с SOF-2 была проложена между WLS-волоконными жгутами одной из башен ЭМК. Измерения световых выходов из башни проведены тем же ФЭУ-115М. Результат измерений показан на рис. 3. Среднее значение сигнала в отсчетах ЗЦП упало примерно в 7.7 раз. Данный результат свидетельствует о том, что используемые в калориметре светодиоды должны иметь достаточный запас яркости для компенсации падения света при переходе через жгут WLS-волокон.

Рис. 3. Результат измерения амплитуд сигналов ФЭУ в отсчетах ЗЦП...

2.3.2. Второй стенд. Он создан для исследования работы системы мониторинга с использованием волокна бокового свечения, имитирующей работу для линейки из восьми модулей ЭМК. В светонепроницаемой комнате был помещен штатный модуль из 16 башен (рис. 4), вдоль жгутов WLS-волокон которого протягивались два волокна бокового свечения SOF-2 диаметром 2 мм и длиной около 3 м в поликарбонатных трубках с внутренним диаметром 3 мм и толщиной стенки 1 мм. Для сопряжения двух волокон со светодиодом на

3D-принтере изготовлен переходник. Съём света с WLS-волокон осуществлялся фотоприемниками Hamamatsu MPPC S13360-6050 с активной областью 6×6 мм² в расчетных точках расположения конкретных башен модулей ЭМК, что создавало имитацию работы системы мониторинга для 128 каналов. Сигналы с фотодетекторов подавались на 64-канальный АЦП [7], специально разработанный для калориметра MPD. Результаты измерения амплитуды сигналов показаны на рис. 5. Усредненные значения длин затухания, вычисленные с помощью формулы (1), составили $\langle \lambda_1 \rangle = 18.3$ см, $\langle \lambda_2 \rangle = 148.4$ см для первого волокна и $\langle \lambda_1 \rangle = 17.3$ см, $\langle \lambda_2 \rangle = 124.1$ см для второго волокна, что совпадает в пределах ошибки с полученными значениями на первом стенде. Это оказалось достаточным для поставленных задач системы мониторинга.

Рис. 4. Фотография одного из типов модулей.

Рис. 5. Зависимость сигнала в отсчетах АЦП с фотодетекторов нескольких башен...

Таким образом, основным достоинством первых двух концепций систем мониторинга с помощью интегрирующей сферы или цилиндра является высокая однородность светового потока для отдельных башен калориметра. К недостаткам этих систем нужно отнести сложную систему оптоволоконной коммуникации и, как следствие, дороговизну. К реализации принята концепция разводки света с помощью волокна SOF-2 как наиболее экономичная и технологичная. Что очень важно, данная сплит-система занимает малое место вследствие ограниченного свободного пространства внутри электромагнитного калориметра MPD.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ МОНИТОРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА

Был разработан дизайн и создан прототип системы мониторинга ЭМК, где свет от одного светодиода распределяется на 256 башен, т. е. один кластер, который соответствует одной корзине электроники считывания сигналов с фотоприемников.

Волокна бокового свечения SOF-2 диаметром 2 мм и длиной около 3 м помещены в поликарбонатные трубки с внутренним диаметром 3 мм и толщиной стенки 1 мм. Для сопряжения волокон со светодиодом был разработан и изготовлен на 3D-принтере специальный держатель, к одной стороне которого крепился светодиод с драйвером и мониторным фотодиодом производства HVSYС [8], к другой стороне – четыре волокна бокового свечения. Каждое волокно распределяло свет на 64 жгута WLS-волокон, как показано на рис. 6. Использовалась штатная система считывания сигналов ЭМК, как описано в п. 2.3.2.

Рис. 6. Фотография фрагмента модуля калориметра с протянутым волокном

В данном прототипе наблюдается значительное свечение вблизи светодиода (см. пояснение к формуле (1)), а также на торце волокна, где свет выходит наружу и засвечивает прилегающие жгуты волокон за счет отражения от стенок. Была использована технология подавления больших сигналов – на волокна SOF-2 вблизи светодиода были надеты черные термоусадочные трубки длиной около 8 см, на дальних концах – трубки длиной примерно 1.5 см, выполнялось чернение выходного торца волокна. Как следствие, улучшилась однородность мониторинговых откликов для каналов ЭМК и расширился динамический диапазон применения сигналов от светодиода. На рис. 7 приведены результаты измерения сигналов от светодиода для 64 фотодетекторов башен калориметра до и после подавления света на концах волокна.

Рис. 7. Распределения сигналов от 64 фотодетекторов башен калориметра вдоль волокна.

Данные кривые отличаются от полученных ранее распределений световых выходов в волокнах. Объясняется это тем, что калориметр имеет проективную геометрию, следовательно, расстояния между фотодетекторами разные. Нужно также принять во внимание, что каналы ЭМК предварительно не калибровались, т. е. не учтены различия в эффективности регистрации фотодетекторов, неодинаковые коэффициенты усиления фотодетекторов и каналов электроники, неоднородность поглощения света жгутами волокон и другие факторы.

Была исследована долговременная стабильность прототипа системы мониторингования. Измерения для четырех каналов продолжались 350 ч, температурная компенсация сигналов фотодетекторов при этом была включена, использовалось воздушное охлаждение электроники, нормировка на сигнал от светодиода не производилась. Частота поджига светодиодов составляла 0.1 Гц. Результаты измерений представлены на рис. 8. Каждая точка на рисунке представляет собой результат усреднения сигналов с АЦП в течение 30 мин. Видно, что разброс сигналов составил порядка 1% по абсолютной величине, а перерыв в работе продолжительностью примерно 13 ч не оказал заметного влияния на стабильность системы мониторингования калориметра.

Рис. 8. Стабильность системы мониторингования для 4 башен в составе полусектора за время 350 ч

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты исследования трех концепций сплит-систем светодиодной системы мониторинга электромагнитного калориметра установки MPD, показаны их недостатки и достоинства. Предложена для дальнейшего использования в ЭМК сплит-система на основе волокна бокового свечения SOF-2. Измеренная длина затухания света в волокне составила 135 ± 15 см. Изучено влияние защитной поликарбонатной трубки на световыход. Вычислены коэффициенты потерь при прохождении света от светодиода до фотодетектора для данного типа сплит-системы.

Разработана конструкция системы мониторинга ЭМК, создан и исследован прототип. Применение технологии подавления света на концах волокон для данной конфигурации позволяет улучшить однородность и расширить динамический диапазон изменения интенсивности светодиодов для мониторинга каналов ЭМК. Показано, что данная конструкция обладает рядом конструктивных достоинств, таких как простота исполнения, технологичность, дешевизна, малое пространство для размещения внутри ЭМК, возможность легкой замены в случае выхода из строя. Результаты измерений показали, что достигнутая точность и стабильность системы мониторинга удовлетворяют требованиям эксперимента.

Авторы выражают благодарность А.Г. Васильевой за помощь в измерениях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта №18-02-40083.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. MPD NICA Technical Design Report of the electromagnetic calorimeter (ECal). https://mpd.jinr.ru/wp-content/uploads/2023/11/TDR_ECAL_v3.6_2019.pdf
2. *Semenov A.Yu., Bazylev S., Belyaeva E. et al.* // JINST. 2020. V. 15. P. C05017. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/05/C05017>
3. *Starchenko E., Blanchot G., Bosman M. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2002. V. 494. P. 381. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)01507-3](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01507-3)
4. *Aphcetché L., Awes T.C., Banning J. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2003. V. 499. P. 521. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)01954-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01954-X)
5. *Боголюбский М.Ю., Паталаха Д.И., Петров В.С. и др.* // ПТЭ. 2012. № 1. С. 16.

6. Описание оптоволоконного кабеля бокового свечения SOF-2.
<https://лайтверк.рф/catalog/optovolokno-bokovogo-svecheniya-2-mm.html>
7. Описание и техническая спецификация ADC-64s. <https://afi.jinr.ru/ADC64s>
8. Светодиодные источники калиброванных коротких вспышек света.
http://hvsys.ru/images/data/news/5_small_1368802948.pdf.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Фотография тестового стенда для изучения различных схем разводки света. Справа виден куб с выточенной внутри интегрирующей сферой; в центре – интегрирующий цилиндр и жгут волокон, слева фотодетектор ФЭУ-115М.
- Рис. 2.** **а** – Зависимость сигнала в фотоэлектронах от расстояния до светодиода: синие точки – без отражателя на торце волокна, красные точки – с диффузной краской в качестве отражателя. Кривые – результаты аппроксимации. **б** – Стабильность работы системы мониторинга за время измерений.
- Рис. 3.** Результат измерения амплитуд сигналов ФЭУ в отсчетах ЗЦП непосредственно из волокна SOF-2 (распределение справа) и из жгута WLS-волокон, когда волокно SOF-2 помещено внутри волокон жгута (распределение слева).
- Рис. 4.** Фотография одного из типов модулей. Видны жгуты WLS-волокон, вдоль которых предлагается размещение волокна SOF-2.
- Рис. 5.** Зависимость сигнала в отсчетах ЗЦП с фотодетекторов нескольких башен с нечетными номерами (волокно № 1) и четными номерами (волокно № 2) для разных модулей в зависимости от расстояния до светодиода. Кривые – результаты аппроксимации.
- Рис. 6.** Фотография фрагмента модуля калориметра с протянутым волокном внутри поликарбонатной трубки. Второе волокно расположено зеркально с другой стороны модуля.
- Рис. 7.** Распределения сигналов от 64 фотодетекторов башен калориметра вдоль волокна. Синие точки соответствуют амплитудам измеренных сигналов до, красные точки – сигналам после подавления света на концах волокна.
- Рис. 8.** Стабильность системы мониторинга для 4 башен в составе полусектора за время 350 ч.

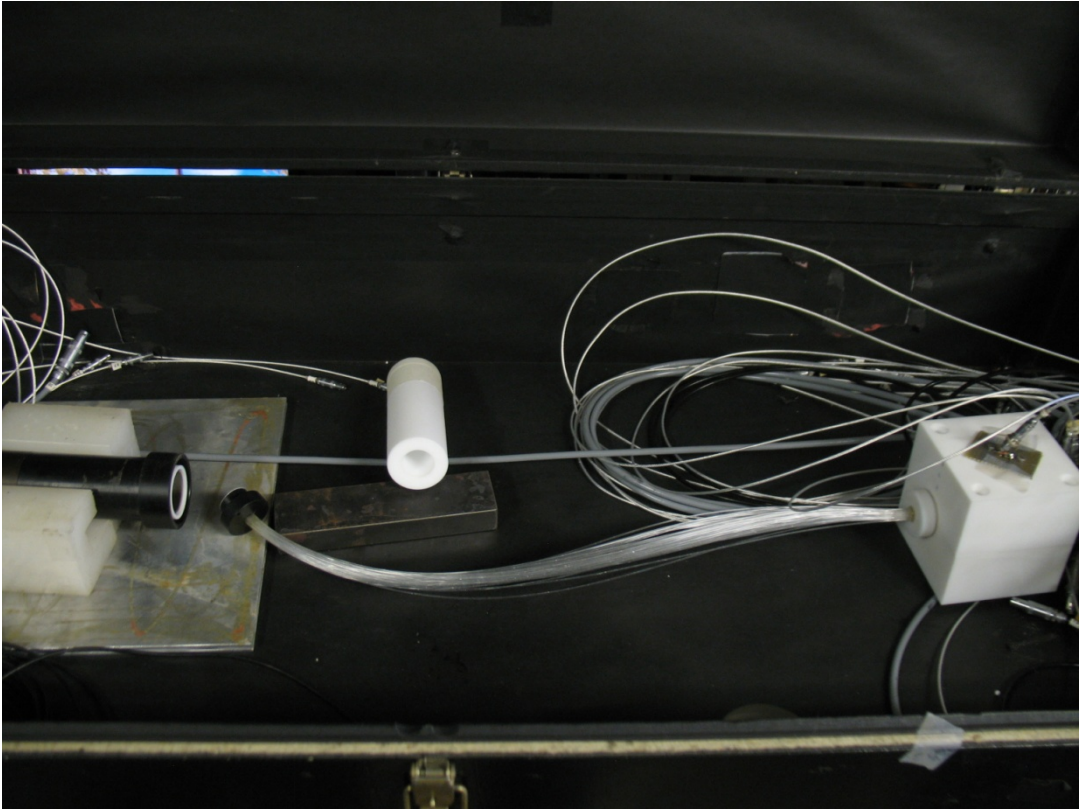


Рис. 1.

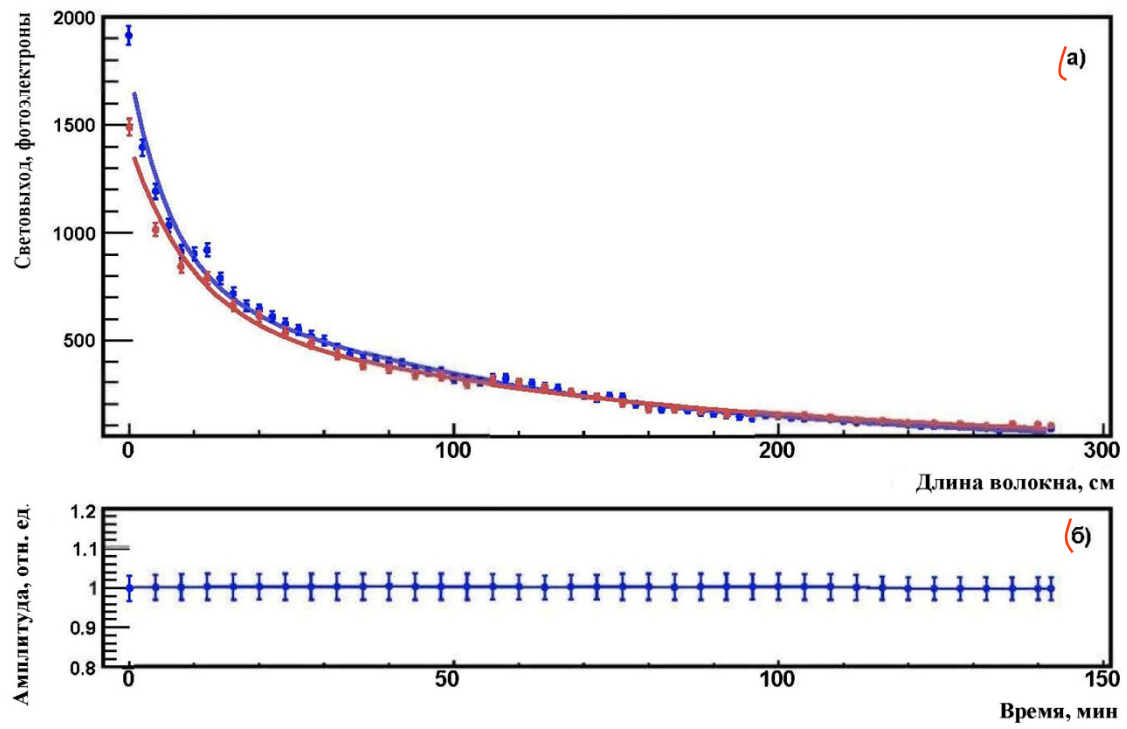


Рис. 2.

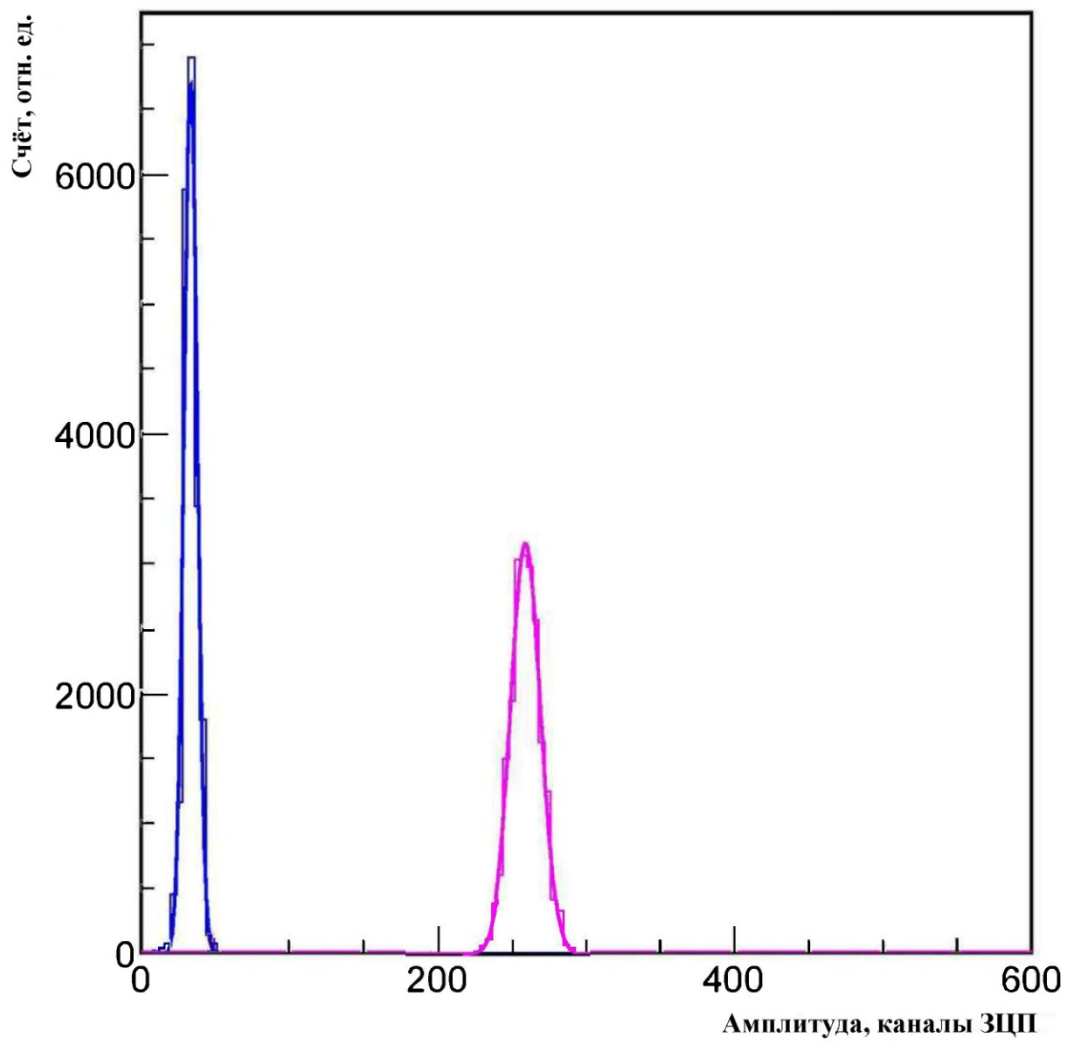


Рис. 3.

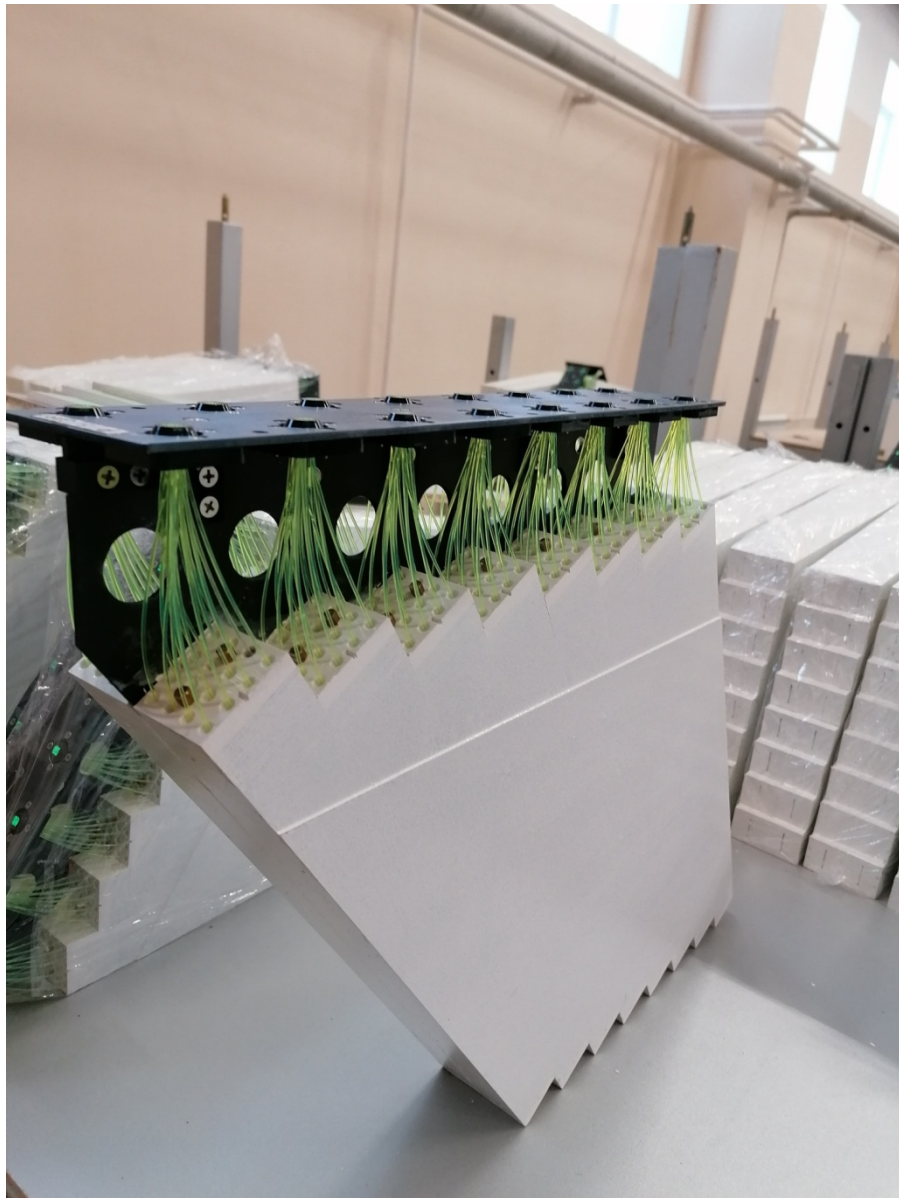
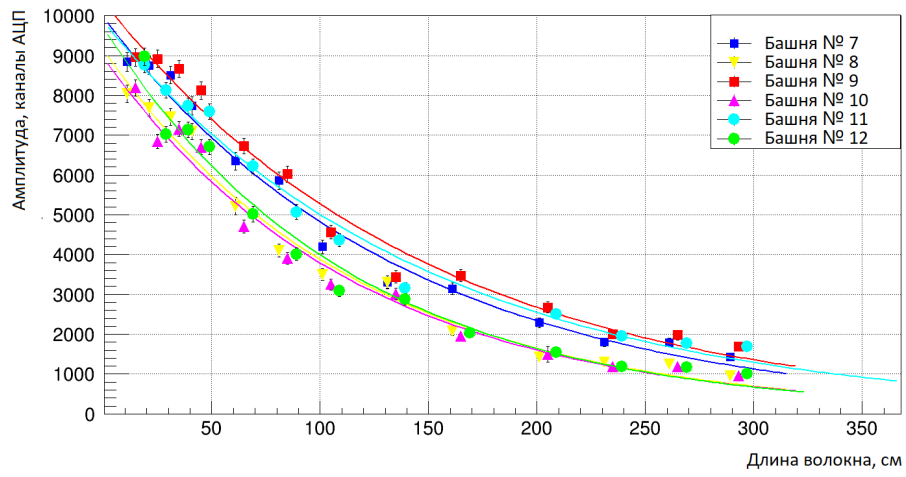


Рис. 4.



сетку убрать

Рис. 5.



Рис .6.

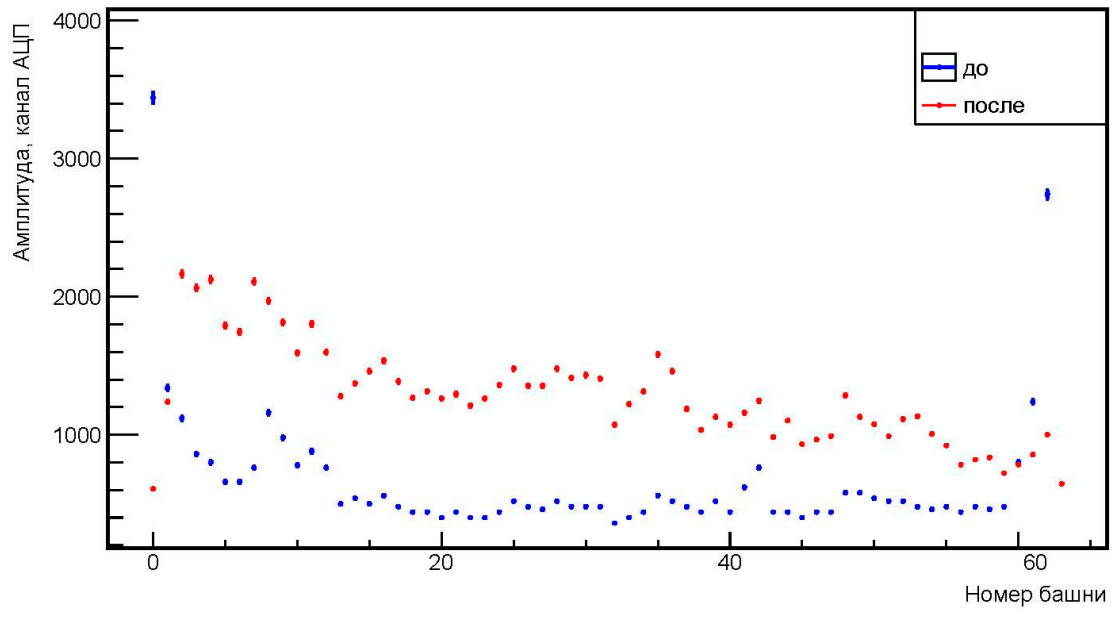


Рис. 7.

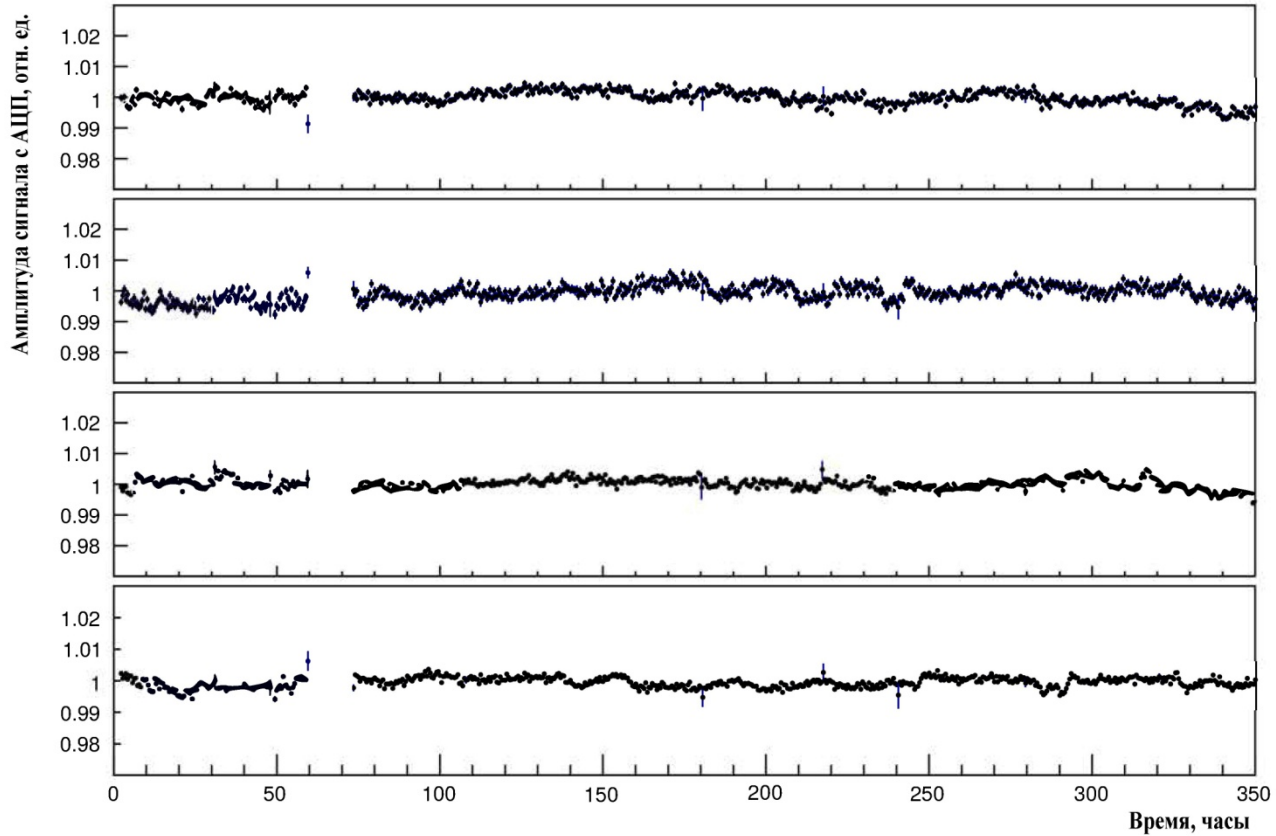


Рис. 8.